

Operación Multihop eficiente en redes Acústicas Submarinas de Sensores con planificación TDMA

Luque-Nieto, Miguel A.^{1,*}, Moreno-Roldán, José M.¹, Poncela, Javier¹ y Otero, Pablo¹

¹ Universidad de Málaga, E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación. Boulevard de Louis Pasteur n° 35, Campus de Teatinos s/n. CP.29010. Málaga. Direcciones electrónicas: luquen@uma.es (M.A.Luque), jmmroldan@uma.es (J.M.Moreno), jponcela@uma.es (J.Poncela), pablo.otero@uma.es (P.Otero).

* Autor Principal y responsable del trabajo; Dirección electrónica: luquen@uma.es (MA.Luque)

Abstract: Dos de los problemas a los que se enfrentan las comunicaciones inalámbricas submarinas, y que limitan sobremanera la velocidad de transmisión de los datos, son (i) la atenuación en el medio acuático, que es selectiva en frecuencia, y (ii) el alto retardo de propagación. El primer factor, obliga a usar frecuencias bajas (acústicas), con una consiguiente degradación en la velocidad de transmisión de datos, que limita las aplicaciones posibles. El segundo problema, hace que las técnicas empleadas para el acceso y transmisión de los nodos (capa de enlace OSI o MAC), deban ser lo más eficientes posible para no demorar en demasía la entrega de datos.

En concreto, en esta comunicación abordamos el problema de una red de nodos con sensores que pretende ser diseñada para minimizar el impacto de los dos problemas anteriormente citados. Para ello, se establece una técnica TDMA en el acceso al medio y se estudia el efecto que tiene una disciplina de servicio para la capa MAC para transmitir paquetes, basada en una cola FIFO con prioridad, bajo una planificación eficiente de transmisiones en la red.

Se plantean distintos escenarios de tráfico generado uniforme o no uniforme por los nodos sensores, además de introducir una métrica (índice de Gini) para la uniformidad de paquetes entregados al Gateway por cada nodo, que es un criterio para que la red sea justa (*fairness*). Como resultados, se aportan medidas de throughput, retardo extremo a extremo de los paquetes, así como tamaño medio y máximo de las colas de cada nodo.

Keywords: S-TDMA; Multihop; USN; Scheduling; String Network.

1. Introducción

En la actualidad, la recogida de datos automática por parte de una red de sensores y su posterior envío a un centro de datos para su procesamiento es una realidad creciente con tendencia a generalizarse

en los próximos años. Sin ir más lejos, ya existen ejemplos en España como el control de agua en terrenos vinícolas para asegurar la buena calidad de la uva [1], o el incipiente interés en dotar a las ciudades (*Smart Cities*) de infraestructura de red que permita proporcionar nuevos servicios a los ciudadanos como *Smart Parking* [2]. Este interés de medición y gestión remota, también se traslada a los ámbitos fluvial y marino, usando redes de sensores submarinas (USNs). Algunos ejemplos de sus aplicaciones son la medida de parámetros medioambientales como la salinidad-temperatura-conductividad del agua del mar con recogida de los datos vía satélite [3], los sistemas de aviso de terremotos/sunamis/erupciones volcánicas [4] o la detección de vertidos tóxicos procedentes de ríos, entre otros usos [5][6]. Sin embargo, existen dos diferencias importantes al usar el agua como medio de propagación frente al aire: (i) una atenuación creciente con la frecuencia y (ii) un alto retardo de propagación. Los fenómenos físicos de radiación y absorción de la onda transmitida en el medio acuático hacen que la atenuación suba mucho con la frecuencia y distancia, limitando el ancho de banda disponible. Ello hace que las frecuencias acústicas sean las mejores candidatas para tener alcances medios de hasta varios km, pero con reducido ancho de banda, en módems comerciales. Por ejemplo, el módem submarino DSPComm AquaComm Orca logra ancho de banda de 100 kHz a distancia máxima de 6 km [7]. Por otro lado, como consecuencia de usar bajas frecuencias, el retardo de la señal es muy alto en comparación con el aire, y se requiere una optimización en los tiempos de envío, así como mantener el sincronismo entre transmisores y receptores.

Debido a que el medio marino es compartido por todos los nodos de la red, se requiere decidir cuál será el mecanismo de acceso al medio (MAC). Hay dos familias de protocolos MAC: acceso por contienda (i), y con planificación de transmisiones (ii). En (i), el nodo compete con el resto de nodos para obtener acceso exclusivo al medio. Algunos ejemplos usados en redes USN son Aloha [8] o Slotted FAMA [9]. Por otro lado, en (ii) hay unas reglas establecidas en la red para transmitir que respetan todos los nodos. Se pueden ver tres grandes categorías de protocolos: FDMA (acceso por frecuencia), CDMA (acceso por código) y TDMA (acceso por ranuras de tiempo). Aunque existen implementaciones de las tres técnicas, TDMA ha demostrado ser muy simple: solo requiere que cada nodo conozca en qué intervalo de tiempo debe transmitir. Esta información se la da la planificación, que sigue un patrón fijo y periódico. Por ejemplo, Stump [10] usa TDMA de forma eficiente.

Una vez aplicada alguna técnica de sincronismo [11], el principal inconveniente de TDMA es tener bajo valor de throughput. Para aumentarlo, se puede usar la técnica S-TDMA [12] donde se permite que varios nodos alejados entre sí, solapen sus transmisiones sin interferencias. Como mejora adicional, se pueden solapar en tiempo las transmisiones de nodos cercanos, aprovechando el alto retardo del canal acústico, mediante el efecto de la superposición de ondas [13]. Introduciendo sendas mejoras (S-TDMA y solape temporal en direcciones opuestas) se ha conseguido obtener una planificación óptima, llegando al máximo throughput alcanzable en redes lineales [14].

Si bien el rendimiento en la red es un objetivo importante, también lo es la igualdad de oportunidades de transmisión de cada nodo, o dicho de otro modo, que la red tenga un comportamiento justo (*fairness*). En una red USN lineal, cuando el nodo recolector de datos o Gateway se sitúa en un extremo, parece claro que una planificación no puede ser máxima en throughput y además justa, pues la distancia entre los nodos y el Gateway no es la misma para cada nodo. Por otro lado, puede tener interés que el tráfico generado por los nodos no sea el mismo, con lo que debemos conocer si la red es estable o no bajo ciertas condiciones de tráfico generado (por ejemplo, sería inestable si el número medio de paquetes almacenado en la cola de recepción de algún nodo crece indefinidamente). Para considerar el tráfico generado por los nodos, primero se debe

elegir una disciplina de servicio adecuada que decida si se transmite un paquete de datos generado por el nodo local, o por el contrario se reenvía un paquete originado por otro nodo.

El objetivo de este artículo es estudiar el comportamiento de una red USN lineal con operación S-TDMA multihop en dos ámbitos: (i) si la red puede o no ser justa, y (ii) viendo el efecto que tiene la aplicación de una disciplina de servicio para transmitir los paquetes en un nodo. Como métricas, se aporta el retardo extremo a extremo sufrido por los paquetes en la red, y se usa el índice de Gini para medir el grado de justicia en la red. Para ello, en la sección 2, se hace una descripción de la topología y operación dentro de la red, indicando la planificación a considerar (óptima en throughput). En la sección 3, se presenta una disciplina de servicio adecuada basada en FIFO con prioridad. En la sección 4, se aportan resultados comparativos del retardo de paquetes, así como el grado de justicia logrado en la red usando el índice de Gini.

2. Modelo de red

2.1. Topología y operación de red

La topología de red propuesta es lineal con $N-1$ nodos sensores equiespaciados y un nodo Gateway en el extremo que recoge los paquetes de datos de los demás nodos. El modo de transmisión es half-duplex, es decir, un nodo puede transmitir o recibir pero no realizar ambas tareas simultáneamente. El modo de transporte en la red es multihop: un nodo transmite a su compañero más próximo (hacia el Gateway) sus paquetes, y así sucesivamente hasta alcanzar el Gateway.

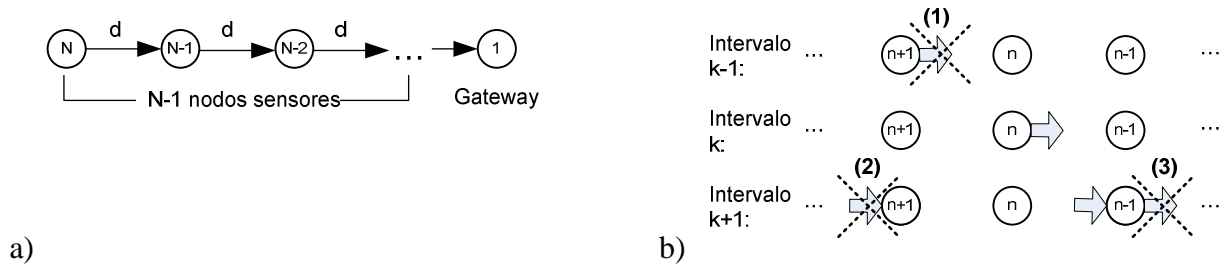


Figura 1. (a) Topología de la red USN lineal y (b) operación para evitar colisiones.

Las condiciones para evitar colisiones en las transmisiones se esquematizan en la Figura 1.b. Si la planificación MAC periódica establece que un nodo n puede transmitir en el intervalo k , esto implica que: (1) el nodo $n+1$ no puede transmitir en el intervalo anterior $k-1$; (2) el nodo $n+1$ no puede recibir en el intervalo $k+1$; (3) el nodo $n-1$ no puede transmitir en el intervalo $k+1$. Estas condiciones deben ser satisfechas por cada pareja de transmisión-recepción en la planificación. Los detalles se encuentran en [14].

2.2. Planificaciones: óptima y justa

En las redes TDMA, se necesita establecer una planificación periódica que establezca el orden de transmisiones (y recepciones) de cada nodo. De esta forma, cada nodo sabe en qué estado debe permanecer según el intervalo de tiempo actual. El mínimo número de estados posibles para los nodos sería 3: transmisión, recepción y libre. En los estados de transmisión/recepción, el nodo realiza la comunicación de datos, mientras que el estado libre puede ser usado para colocar al nodo en bajo consumo, aumentando así su autonomía energética. Por otro lado, podemos considerar que una planificación óptima será aquella que consiga tener un mayor número de transmisiones (o recepciones) para el mismo período de tiempo, o dicho de otra forma, un mayor valor de throughput. Para una red de 5 nodos, la Figura 2.a. muestra cuál sería dicha planificación óptima, que posee un

período de 4 intervalos de tiempo (trama). Es posible encontrar la planificación óptima para cualquier número de nodos [14].

Otro criterio diferente sería que la planificación empleada fuera justa, es decir, que en una trama el número de paquetes entregados al Gateway procedentes de cada nodo fuera el mismo. La Figura 2.b. muestra cuál sería la planificación justa más corta en tiempo posible para el ejemplo de 5 nodos planteado.

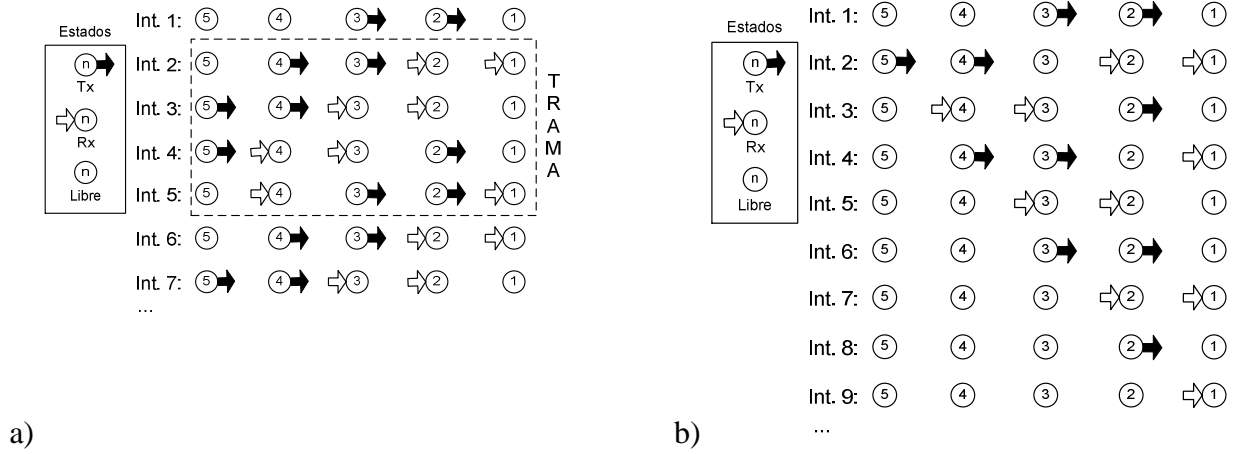


Figura 2. Ejemplo de planificación óptima en throughput (a) frente a una planificación justa (b) para una red lineal de 5 nodos.

Se puede observar como necesariamente el período de la planificación justa debe ser mayor que el de la planificación óptima, haciéndola más ineficiente en número de transmisiones/recepciones. Por esta razón, en adelante dicha planificación no se tomará en cuenta y se analizará si la planificación óptima consigue un grado de justicia aceptable. Para ello, introducimos en el siguiente apartado el índice de Gini como métrica que valore si la cantidad de paquetes que llegan al Gateway es una distribución uniforme (caso de igual tráfico generado por los nodos) o se aleja de ella.

2.3. Índice de Gini

Una de las medidas clásicas de desigualdad es el llamado índice de Gini [15], empleado originalmente para medir la distribución de ingresos en economía [16], aunque se ha extendido a muchas áreas, incluyendo la mejora de distribución de recursos en redes de paquetes [17]. En nuestro caso, queremos aplicar este índice para medir cuanto de alejado está una planificación de ser justa. Para ello, el índice G de Gini puede ser calculado a partir de [18]:

$$G(N) = \frac{1}{2 N^2 \bar{x}} \sum_{k=2}^N \sum_{n=2}^N |x_k - x_n| \quad (1)$$

, siendo N el número total de nodos, x_k el número de paquetes entregados al Gateway por el nodo k , y \bar{x} la media de paquetes entregados (x). El mínimo valor para el factor de Gini es 0, indicando que x sigue una distribución uniforme.

3. Disciplina de servicio

Para poder modelar el comportamiento de la red USN multihop, cada nodo necesita saber si en su intervalo de transmisión, reenvía un paquete ajeno, o por el contrario envía un paquete generado por él (paquete *propio*). Este criterio de decisión de qué paquete enviar, recibe el nombre de disciplina de servicio de la cola [19]. En la Figura 3, se puede ver cómo funcionaría la red para el caso de una disciplina FIFO con prioridad. Los paquetes a reenviar, se guardan en una cola diferente a los

Operación Multihop eficiente en redes Acústicas Submarinas de Sensores con planificación TDMA paquetes propios del nodo. Luego se establece alguna prioridad sobre qué cola servir cuando se produzca el intervalo de transmisión del nodo según la planificación.

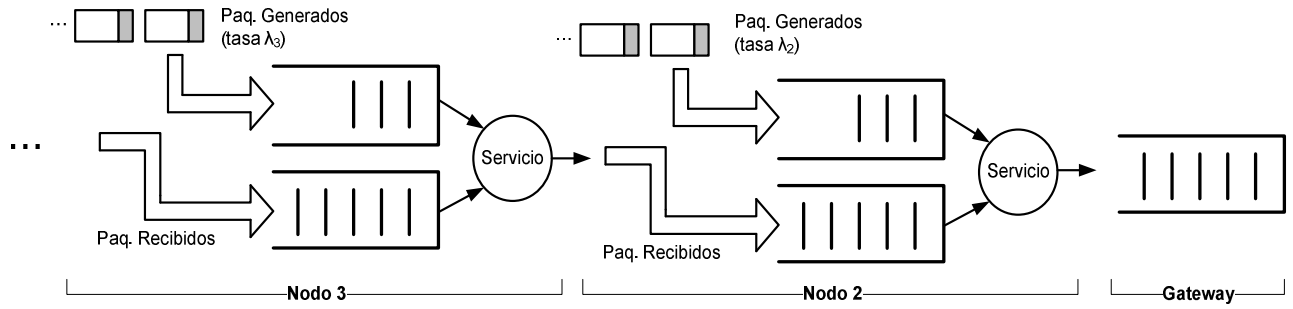


Figura 3. Modelo de colas según disciplina FIFO con prioridad.

Esta disciplina trabaja de forma similar a un sistema de colas tándem con único servicio por nodo, donde la entrega de paquetes se da al final de la red (Gateway). No sería necesario recurrir al análisis riguroso por teoría de colas, puesto que todos los eventos son deterministas: la planificación dicta cuándo se producen las Tx/Rx para cada nodo. Además, dicho análisis sería muy tedioso, debido a la disciplina de servicio y posibles diferentes tasas de tráfico por nodo, por lo que usaremos el entorno numérico Matlab para obtener resultados con tiempos de simulación elevados.

Para respetar la tasa de tráfico generado, cada nodo tiene un contador de slots, que se incrementa cuando se asigna un slot de transmisión. Cuando el contador llega a su valor máximo establecido, significa que se puede transmitir un paquete propio. De esta forma, si se varía el máximo del contador para un nodo, se cambia la intensidad de tráfico generado por dicho nodo. Se requiere definir la variable de dicho contador, W en nuestro caso, según la nomenclatura siguiente:

W_k : número de slots de transmisión transcurridos para el nodo k ;

$W_{k,max}$: máximo valor de W_k . Cuando $W_k = W_{k,max}$, se transmite paquete propio (y $W_k = 0$);

$W_{k,ini}$: valor inicial impuesto para W_k .

El uso de un valor inicial de contador ($W_{k,ini}$) diferente de 0 para cada nodo, permite ajustar diferentes instantes para la transmisión de paquete propio entre los nodos. Ello tiene repercusiones para mejorar el retardo extremo a extremo, como se verá posteriormente en el apartado de resultados.

Por otro lado, es muy importante mantener la estabilidad en la red. Por ejemplo, si un nodo k decide no reenviar paquetes ($W_{k,max}=1$, solo Tx paquetes propios), cortaría el flujo de los nodos predecesores hacia el Gateway, además de hacer indefinidamente las colas. La condición de estabilidad exige que el tráfico total generado por los nodos no exceda el máximo throughput que admite la red ($= \frac{1}{2}$). Según este razonamiento, se debe cumplir que:

$$\sum_{k=2}^N \lambda_k \leq \frac{1}{2} \quad (2)$$

, siendo λ_k la tasa de generación de paquetes del nodo k .

4. Resultados y discusión

Se han obtenido datos procedentes de simulaciones en el entorno Matlab, relativos al throughput, fairness mediante el índice de Gini, y retardo extremo a extremo de los paquetes.

4.1. Throughput

El throughput medio S de una planificación, se calcula como el cociente entre el número de recepciones y slots en un período [13]. Sabiendo que es imposible encontrar una planificación con valor ideal para $S (= \frac{N}{2})$ en una red lineal con más de 2 nodos [13], se observa en la Figura 4 que la planificación óptima es muy eficiente, y supera a la planificación justa propuesta en la Figura 2.

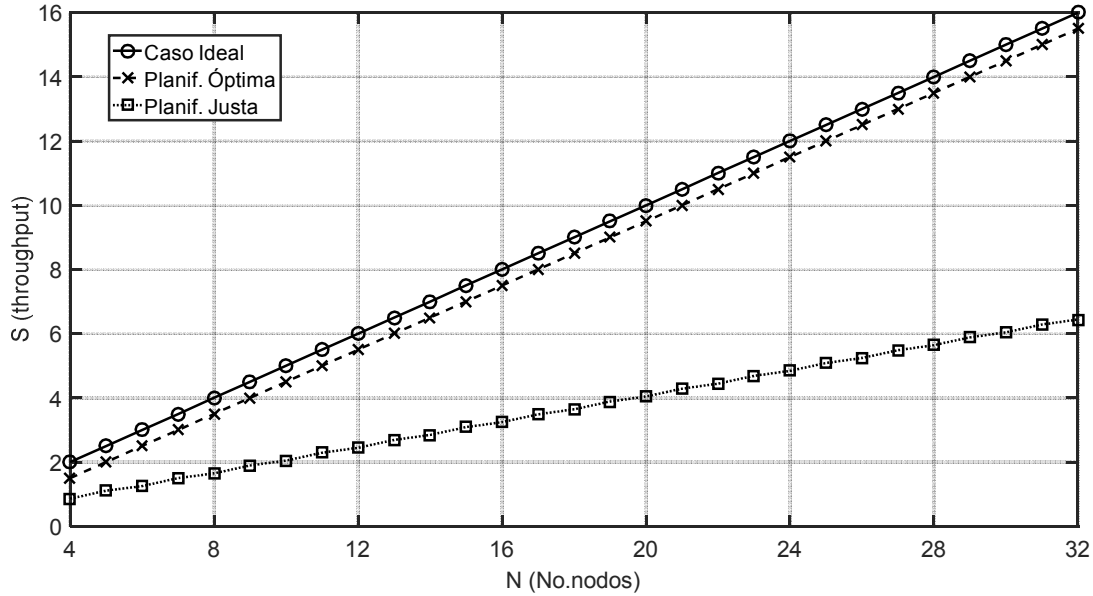


Figura 4. Throughput obtenido en los casos de planificación óptima y plana, respecto al ideal.

4.2. Fairness

Retomando el concepto de la justicia para la planificación óptima y usando la disciplina de servicio FIFO con prioridad presentada, se presenta en la Tabla 1 el índice de Gini para distintos tamaños de red, donde P_k es el número de paquetes entregados al Gateway procedentes del nodo k .

Tabla 1. Índice de Gini para la planificación óptima. Tiempo de simulación: 1000 slots.

N	Tráfico generado [$\lambda_N \lambda_{N-1} \dots \lambda_2$]	Índice de Gini	No. Paq. Entregados [$P_N P_{N-1} \dots P_2$]	Máx. Paq. Cola
4	[$\frac{1}{8} \frac{1}{8} \frac{1}{8}$]	0	[124 124 124]	2
4	[$\frac{1}{8} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$]	0.0845	[124 187 186]	126
4	[$\frac{1}{6} \frac{1}{8} \frac{1}{8}$]	0.0676	[166 124 124]	2
4	[$\frac{1}{8} \frac{1}{6} \frac{1}{8}$]	0.0676	[124 166 124]	2
4	[$\frac{1}{8} \frac{1}{8} \frac{1}{6}$]	0.0676	[124 124 166]	2
5	[$\frac{1}{8} \frac{1}{8} \frac{1}{8} \frac{1}{8}$]	0	[124 124 124 124]	2
6	[$\frac{1}{8} \frac{1}{16} \frac{1}{16} \frac{1}{8} \frac{1}{8}$]	0.1522	[123 61 62 124 124]	2

Se puede observar en las dos primeras filas el efecto de la estabilidad. En la primera fila, se cumple (2) y la cantidad de paquetes entregados respeta la proporción del tráfico generado uniforme, con máximo 2 paquetes en cola. El segundo caso, no cumple (2) y es inestable, con colas crecientes en el tiempo. Además se observa como el índice de Gini es nulo en el primer caso, indicando distribución homogénea perfecta de paquetes recibidos, y mayor de 0 en el segundo caso. En las filas 3-5 de la Tabla 1, se muestra el buen funcionamiento de la red diseñada, y se ve que en condiciones de tráfico no homogéneo, el comportamiento de la red es el esperado independientemente de qué

Operación Multihop eficiente en redes Acústicas Submarinas de Sensores con planificación TDMA nodo genere más tráfico. Por último, para redes con mayor número de nodos, las últimas filas de la Tabla 1 muestran similar comportamiento al descrito para $N=4$.

A la vista de los resultados, se puede concluir que la planificación óptima junto con la disciplina de servicio propuesta, permite asegurar que para un tráfico generado que cumpla el criterio (2), la red es justa y mantiene en el Gateway la misma proporción de paquetes generados en origen.

4.3. Retardo extremo a extremo

En este apartado medimos dos efectos: (i) el retardo de paquete según la planificación óptima y (ii) el efecto que tiene el estado inicial del contador $W_{ini,k}$. Para ello, la Tabla 2 muestra tanto el retardo medio y máximo como los paquetes entregados y tamaño máximo de cola.

Tabla 2. Retardo extremo a extremo. Tiempo de simulación: 1000 slots.

N	Tráfico generado [$\lambda_N \lambda_{N-1} \dots \lambda_2$]	[$W_{ini,N} W_{ini,N-1} \dots W_{ini,2}$]	Ret. (slots) Medio/Máx.	No. Paq. Entregados [$P_N P_{N-1} \dots P_2$]	Máx. Paq. Cola
4	[$1/6 \ 1/8 \ 1/8$]	[0 1 2]	3.99 / 7	[166 124 125]	2
		[2 2 1]	5.29 / 11	[166 124 125]	2
	[$1/8 \ 1/6 \ 1/8$]	[2 0 2]	3.69 / 7	[124 166 125]	2
		[3 1 1]	4.99 / 11	[124 166 125]	2
	[$1/8 \ 1/8 \ 1/6$]	[0 1 2]	3.29 / 7	[124 124 167]	1
		[1 0 1]	4.69 / 11	[124 124 166]	2
5	[$1/8 \ 1/8 \ 1/8 \ 1/8$]	[0 2 3 2]	4.98 / 9	[124 124 125 125]	2
		[3 1 0 3]	7.97 / 15	[123 124 124 125]	2
6	$\lambda_k = 1/10$ ($k = 2..6$)	[1 1 1 4 1]	6.96 / 13	[98 99 99 100 100]	2
		[1 4 2 1 0]	10.95 / 21	[98 99 99 99 99]	4

Las primeras tres filas reflejan un escenario en que uno de los nodos genera tráfico doble que los otros dos. Para cada una de las tres situaciones, se hizo un barrido con todos los valores posibles de $W_{k,ini}$ con objeto de ver el efecto que tenía en el retardo final. En la Tabla 2 se han reflejado los valores para $W_{k,ini}$ que arrojan el menor y mayor valor de retardo medio. El resto de valores $W_{k,ini}$ arrojan retardos comprendidos entre estos dos valores mostrados.

La mayor implicación que tiene el valor del contador inicial $W_{k,ini}$ es en el retardo máximo, que puede pasar de 7 a 11 slots según el valor escogido, lo que supone un aumento del 57.14%. Esta cifra es inabordable en la práctica, por lo que se debe tener en cuenta en el diseño qué valor inicial $W_{k,ini}$ debe tener cada nodo para evitar este alto retardo. Las restantes filas de la Tabla 2, reflejan similar comportamiento para redes con mayor número de nodos, pero siempre mostrando un funcionamiento estable como consecuencia de cumplir (2).

5. Conclusiones

Se ha propuesto una planificación óptima de transmisiones libre de colisiones, que mejora el throughput en una red lineal con acceso TDMA al medio subacuático, junto con el uso de una disciplina de servicio FIFO con prioridad. Este tándem ha logrado hacer que la red sea justa, y se ha aplicado una métrica (índice de Gini) para justificar el grado de homogeneidad en el número de paquetes recibidos de cada nodo por el Gateway. En relación al retardo extremo a extremo de los paquetes, se ha podido constatar que si bien el retardo medio de la red es bastante inmune a las condiciones iniciales del contador de transmisiones, no ocurre así con el retardo máximo, lo que

indica que el diseño de la red requiere un estudio previo para ajustar el valor inicial $W_{k,ini}$ de cada nodo k según su tráfico generado λ_k y el tamaño de la red lineal N .

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con ayuda de la Universidad de Málaga (Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech).

Referencias

1. Del Valle Arias J, Palacios Marugán R. Trabajar la tierra con redes inalámbricas de sensores. *Revista Bit*. **2012**; 188(Marzo): 67-70.
2. Evenepoel S, et al. On-street smart parking networks at a fraction of their cost: performance analysis of a sampling approach. *Trans. on Emerging Telecom. Tech.*. **2014**; 25(1): 136–149.
3. Programa Argo. <http://www.argo.ucsd.edu/>
4. Gasparini P, Manfredi G, Zschau J. Earthquake Early Warning Systems. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*; **2007**. ISBN: 978-3-540-72240-3 (Print) 978-3-540-72241-0 (Online).
5. Xiao, Y.(ed.). Underwater acoustic sensor networks. *CRC Press*; **2010**.
6. Felemban E, Shaikh F.K, et al. Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey. *Int. Journal of Distributed Sensor Networks*. **2015**; Article ID 896832, 14 págs.
7. Sendra S, Lloret J, Jimenez JM, & Parra L. Underwater acoustic modems. *IEEE Sensors Journal*. **2016**; 16(11): 4063-4071.
8. Chirdchoo N, Soh W, and Chua K.C. ALOHA-based MAC Protocols with Collision Avoidance for Underwater Acoustic Networks. *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*; **2007**; pp.2271-2275, 6-12 May; Anchorage (Alaska).
9. Molins M, and Stojanovic M. Slotted FAMA: A MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks. *Proc. OCEANS'06 MTS/IEEE (Singapore)*; **2006**; 16-19 May.
10. Kredo K, Djukic P, and Mohapatra P. STUMP: Exploiting Position Diversity in the Staggered TDMA Underwater MAC Protocol. *Proc. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*; **2009**; pp.2961-2965, 19-25 Apr; Rio de Janeiro (Brazil).
11. Chen K. et al. A survey on MAC protocols for underwater wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*; **2014**; 16(3): 1433-1447.
12. Luque-Nieto M.A, Moreno-Roldán J.M, Poncela J, and Otero P. Optimal Fair Scheduling in S-TDMA Sensor Networks for Monitoring River Plumes. *Journal of Sensors (Ed. Hindawi)*; **2016**; Article ID 8671516, 6 pages.
13. Chitre M, Motani M, and Shahabudeen S. Throughput of networks with large propagation delays. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*; **2012**; 37(4): 645-658.
14. Luque-Nieto M.A, Moreno-Roldán J.M, Poncela J, and Otero P. Análisis de Planificaciones para redes Acústicas Submarinas de Sensores con Topología Lineal. *IV Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad (DESEi+d)*; **2016**; pp.11-18, 16-18 Nov; San Javier (Murcia).
15. Gini C. Variabilità e Mutuabilità. Contributo allo Studio delle Distribuzioni e delle Relazioni Statistiche. *Tipografia di Paolo Cuppini*; **1912**; Bologna (Italy).
16. Gini C. Measurement of inequality of incomes. *Economic Journal*; **1921**; 31(121): 124–126.
17. Ning Z, Guo L, et al. Joint scheduling and routing algorithm with load balancing in wireless mesh network. *Computer & Electrical Engineering (Ed. Elsevier)*; **2012**; 38(3): 533-550.
18. Gastwirth J.L. The estimation of the Lorenz curve and Gini index. *The review of economics and statistics*; **1972**; 54(3): 306-316.
19. Haviv M. Queues: A course in Queueing theory. *International series in Operations Research and Management Science (Ed. Springer)*; **2013**; Vol. 191.